

2. ANSYS CFX [Электронный ресурс] / CAE Expert. – Режим доступа: <https://cae-expert.ru/product/ansys-cfx>. – Дата доступа: 18.04.2020.

В. В. Шекелевский, К. Т. Логунов
(БГУИР, Минск)

Науч. рук. Д. А. Котов, канд. техн. наук, доцент

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В современном промышленном производстве изделий микро-, нано- и оптоэлектроники одним из самых распространенных методов нанесения тонкопленочных покрытий является магнетронное распыление [1]. Несмотря на то, что метод используется уже много десятилетий, в настоящее время все еще является актуальной разработкой методик расчета и количественной оценки явлений и процессов магнетронного распыления и конденсации на подложке. В связи с чем для расчета тлеющего разряда в магнетронной системе используются различные программные комплексы для физического моделирования. Основным требованием для таких комплексов является возможность рассчитывать электрические и магнитные поля, определяющие количественные и качественные параметры разряда. На сегодня одним из самых распространенных методов расчета различных полей является метод конечных элементов, который используется во многих коммерческих и бесплатных программах для мультифизического моделирования. Среди которых Comsol Multiphysics, Ansys, Elcut и другие.

Основным недостатком этих программ для расчета тлеющего разряда является сам метод конечных элементов [2], который не позволяет получать непрерывные значения полей вдоль определенной прямой, что приводит к трудностям в решении дифференциальных уравнений методами Monte-Carlo (MC), Particle-in-Cell (PIC) [3], Particle-in-Cell Monte-Carlo (PIC-MC) и других.

Альтернативой могут являться языки программирования, на которых имеется возможность реализации решения аналитических уравнений для электро- и магнитостатики [4]. Примером может служить

бесплатная библиотека Magpylib, реализованная на языке программирования Python [5].

Эта библиотека использовалась нами для расчета магнитных полей в используемой нами магнетронной системе, а для оценки правильности расчета программный комплекс Comsol Multiphysics, хорошо зарекомендовавший себя в научно-технических расчетах.

Вначале для расчета воссоздается 3D модель магнитной системы магнетрона. В библиотеке Magpylib эта задача решается путем задания координат встроенным простым трехмерным объектам (куб, сфера, цилиндр) и их размещением с заданием остаточной индукции магнитного поля реальных. Визуализация линий магнитной индукции осуществляется с помощью бесплатной библиотеки для вывода данных в графическом виде Matplotlib. Пример расчета показан на рисунке 1 для сечения плоскостью, проходящей через ось магнетрона.

Для расчета той же магнитной системы с помощью Comsol Multiphysics использовалась трехмерная модель, разработанная в Autodesk Inventor. Результат расчета показан на рисунке 2.

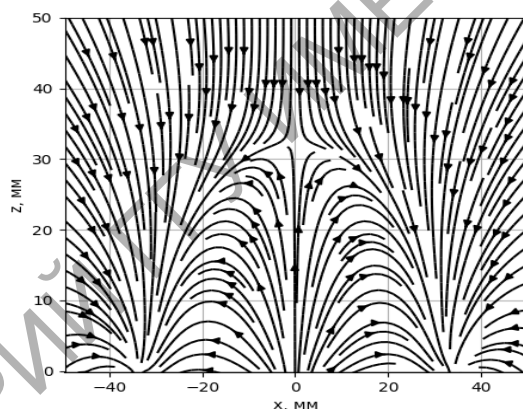


Рисунок 1 – Визуализации линий индукции магнитного поля в разработанной нами программе с помощью библиотеки Magpylib

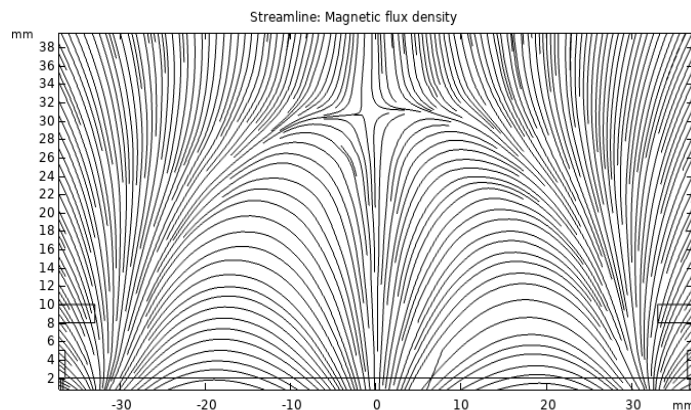


Рисунок 2 – Расчет магнитного поля над поверхностью используемого плоского магнетрона в программе Comsol Multiphysics

Сравнение полученных результатов показывает, что при одинаковых начальных условиях значения индукции магнитного поля совпадают с погрешностью на размер разбиения сетки в Comsol Multiphysics. Графики, полученные в Comsol имеют ступенчатый вид, связанный с недостатком метода конечных элементов, а в Python гладкий, в связи с решением аналитических уравнений. В данном случае при решении уравнений движения заряженных частиц в скрещенных и электрических полях методом Monte-Carlo предпочтительнее использовать Magpylib.

Литература

1. Кузьмичев, А. И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления / А. И. Кузьмичёв. – Киев. : Аверс, 2008. – 244 с.
2. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 5.1. С-Пб. : Производственный кооператив TOP, 2003. – 252 с.
3. Kondo, S. A self-consistent numerical analysis of a planar dc magnetron discharge by the particle-in-cell/Monte Carlo method / S. Kondo, K. Nanbu // J. Phys. D : Appl. Phys. – 1999. – Vol. 32. – P. 1142-1152.
4. Norman, D. Cylindrical magnets and ideal solenoids / Norman Derby, Stanislaw Olbert // Am. J. Phys. – 2010. – Vol. 78. – №3. – P. 229-235.
5. Magpylib [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://magpylib.readthedocs.io/>. – Дата доступа: 20.02.2021.